

超精密偏光計測が可能にする 新しいダークマター探索

道村唯太

東京大学 大学院理学系研究科 物理学専攻



自己紹介

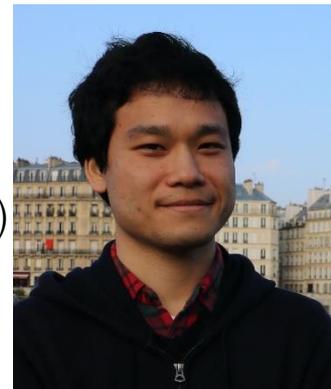
1987年8月生まれ。神奈川県横浜市出身。博士(理学)。

略歴

2009-2013年	東京大学 大学院理学系研究科 物理学専攻 坪野研究室
2013年	退職に伴い、安東研究室
2014年-現在	D3の途中で安東研究室助教

研究内容

重力波望遠鏡KAGRA、DECIGO
光リング共振器を用いたローレンツ不変性の検証 (博士論文のテーマ)
光学機械系を用いた巨視的量子力学の検証 (CREST量子技術)
レーザー干渉計を用いた超軽量ダークマター探索



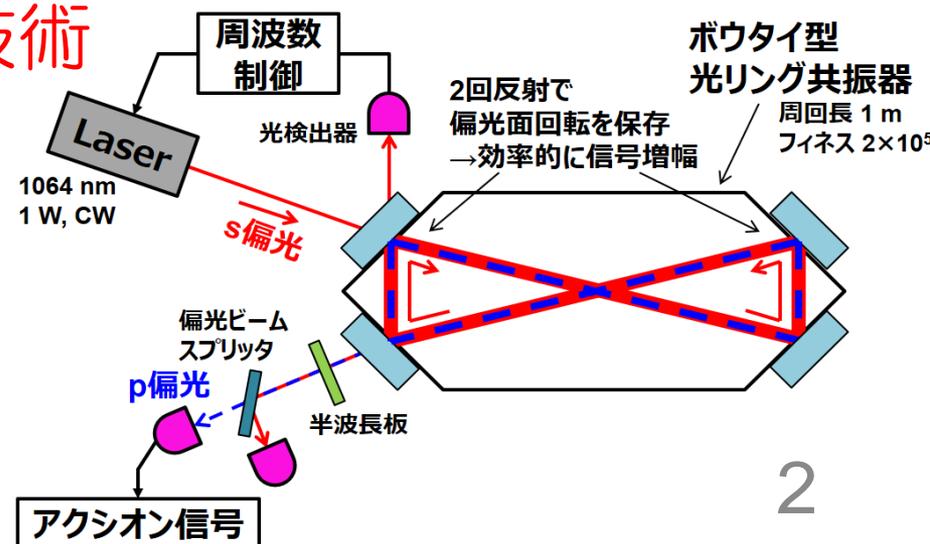
さきがけ研究の概要

- レーザー干渉計の偏光計測により、
超軽量ダークマターを初探索
 - ダークマター有力候補であるアクシオンに着目
 - 独自の新手法 [PRL 121, 161301 \(2018\)](#)
強磁場不要
ボウタイ共振器で偏光信号を効率的に増幅
 - 達成目標: 世界最高精度での探索

- 発展させる革新的な光技術

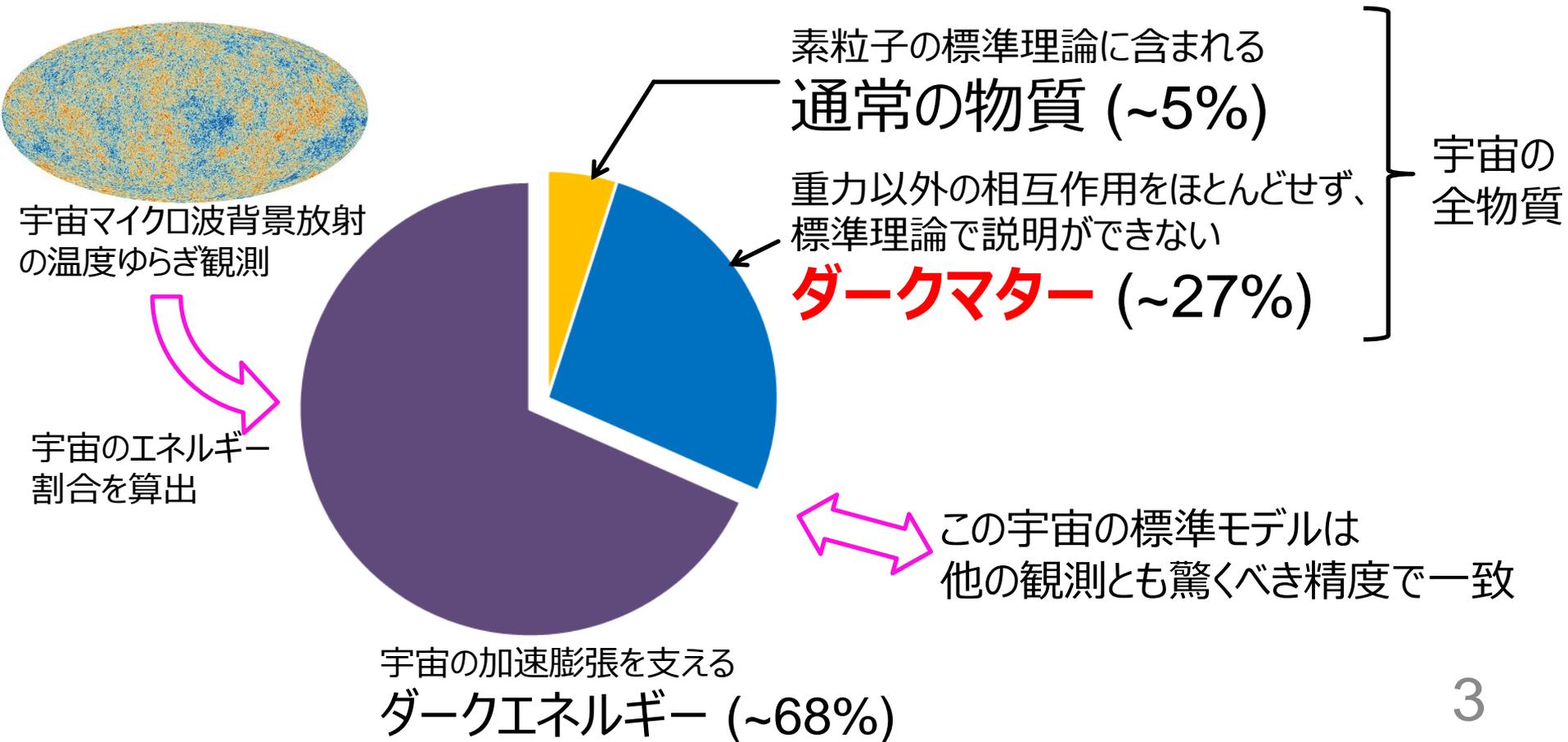
- 超精密偏光計測
- 超低振動光共振器

- ダークマター探索の
新局面を開拓



背景: ダークマターの謎

- 1930年代に銀河の回転速度の観測から存在指摘
- 現代では全物質の約80%を占めることが明らかに
- 依然として正体は不明



背景: ダークマター探索

- 長年の間**WIMP**に探索が集中するも**未発見**
近い将来、太陽・大気ニュートリノのバックグラウンドで検出限界に
- より網羅的な、**新発想の探索**が求められている

ダークマターの質量 (GeV)

太陽質量
($1.1e57$ GeV)

10⁻³⁰ 10⁻²⁰ 10⁻¹⁰ 10⁰ 10¹⁰ 10²⁰ 10³⁰ 10⁴⁰ 10⁵⁰ 10⁶⁰

波長が矮小銀河のサイズを超えるので排除

重カマイクロレンズやCMB観測から排除

超軽量粒子

軽い粒子

WIMP

重い粒子

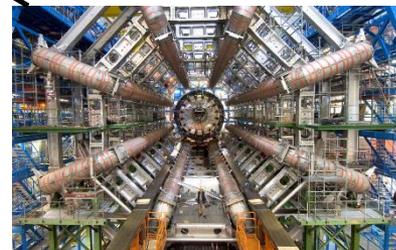
複合物質・原始ブラックホールなど



本研究でレーザー干渉計による初探索



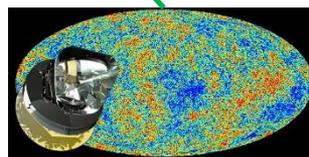
XENON1Tなど地下実験



LHC 巨大ハドロン加速器



すばる望遠鏡など



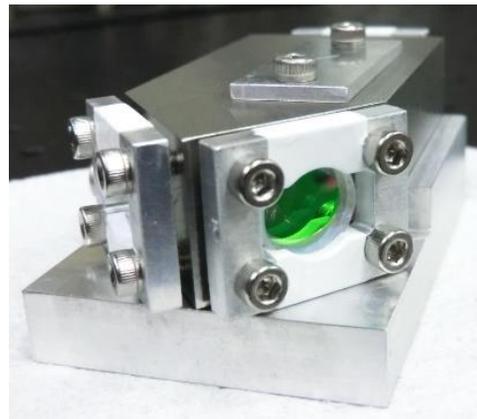
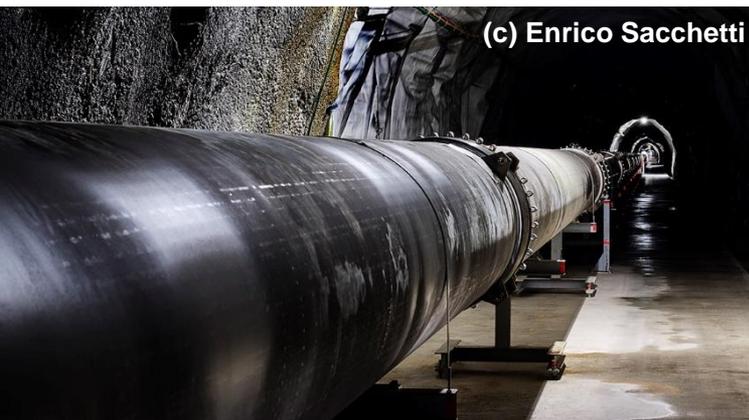
宇宙マイクロ波背景放射観測

ヒッグス粒子 (125 GeV)

プランク質量 ($1.1e19$ GeV)

レーザー干渉計による新しい探索

- 特に、未発見粒子の**アクシオン**に着目
 - 光子とわずかに相互作用
 - 超ひも理論などもアクシオンの存在を予言
 - 近年高い注目を浴びている
 - ※ XENON1Tの6月の発表もアクシオン検出の可能性を示唆
- アクシオンが引き起こす**光の偏光状態の変化**を精密に計測することで、**かつてない精度で探索**
 - 信号が初検出される可能性を秘めた研究
 - 重力波検出やローレンツ不変性検証実験の経験を応用



アクシオンと光子の相互作用

- 相互作用により右円偏光と左円偏光に**速度差**

$$c_{L/R} = c_0 \sqrt{1 \pm \frac{g_{a\gamma} a_0 m_a}{k} \sin(\omega_a t + \delta_\tau)}$$

相互作用係数

光の波数

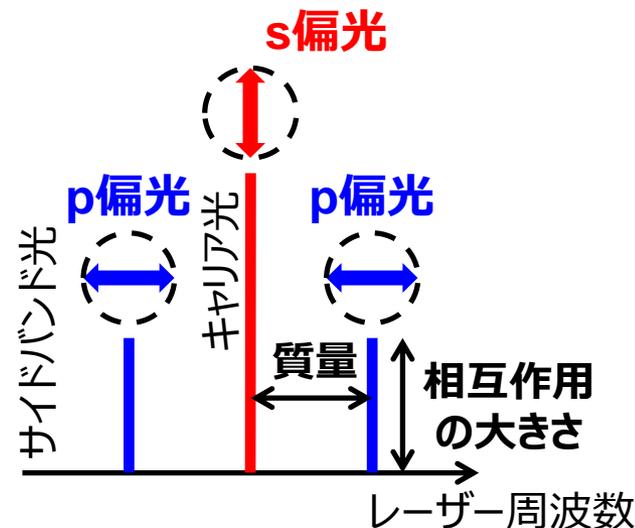
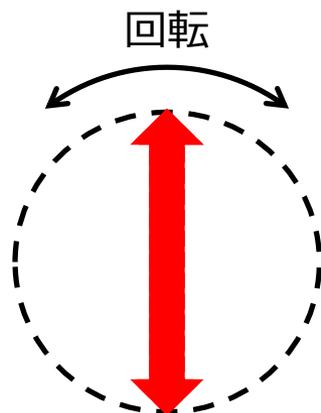
光の波数
 アクシオン場の
 振幅

アクシオン
 質量

アクシオン質量に
 対応した周波数

- 直線偏光の偏光面が**周期的に回転**

s偏光の場合、
 p偏光成分が
 生じる

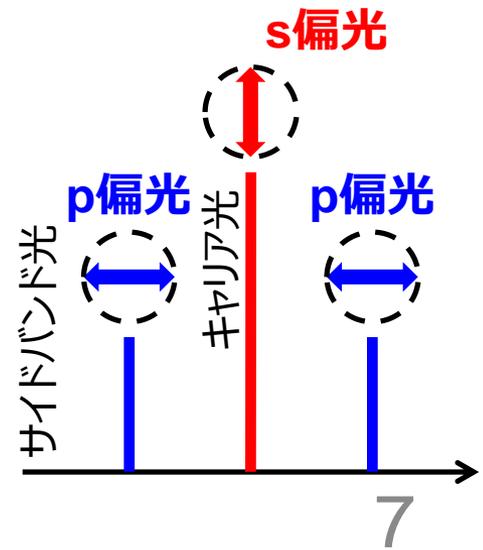
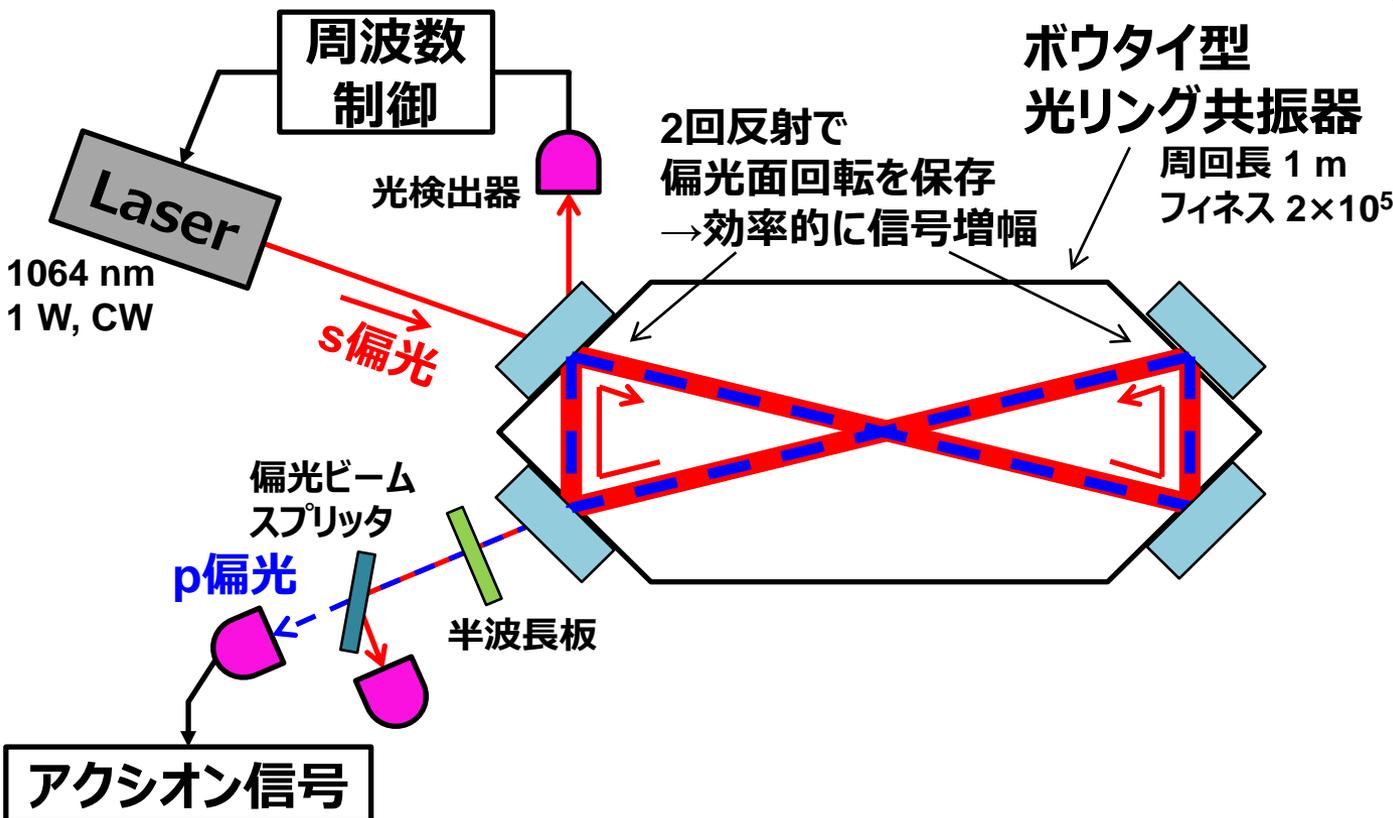
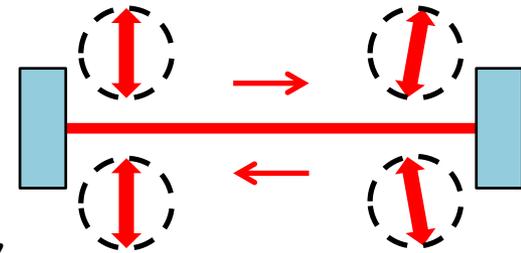


- 回転の周期からアクシオンの質量
 振幅から相互作用の大きさ

がわかる

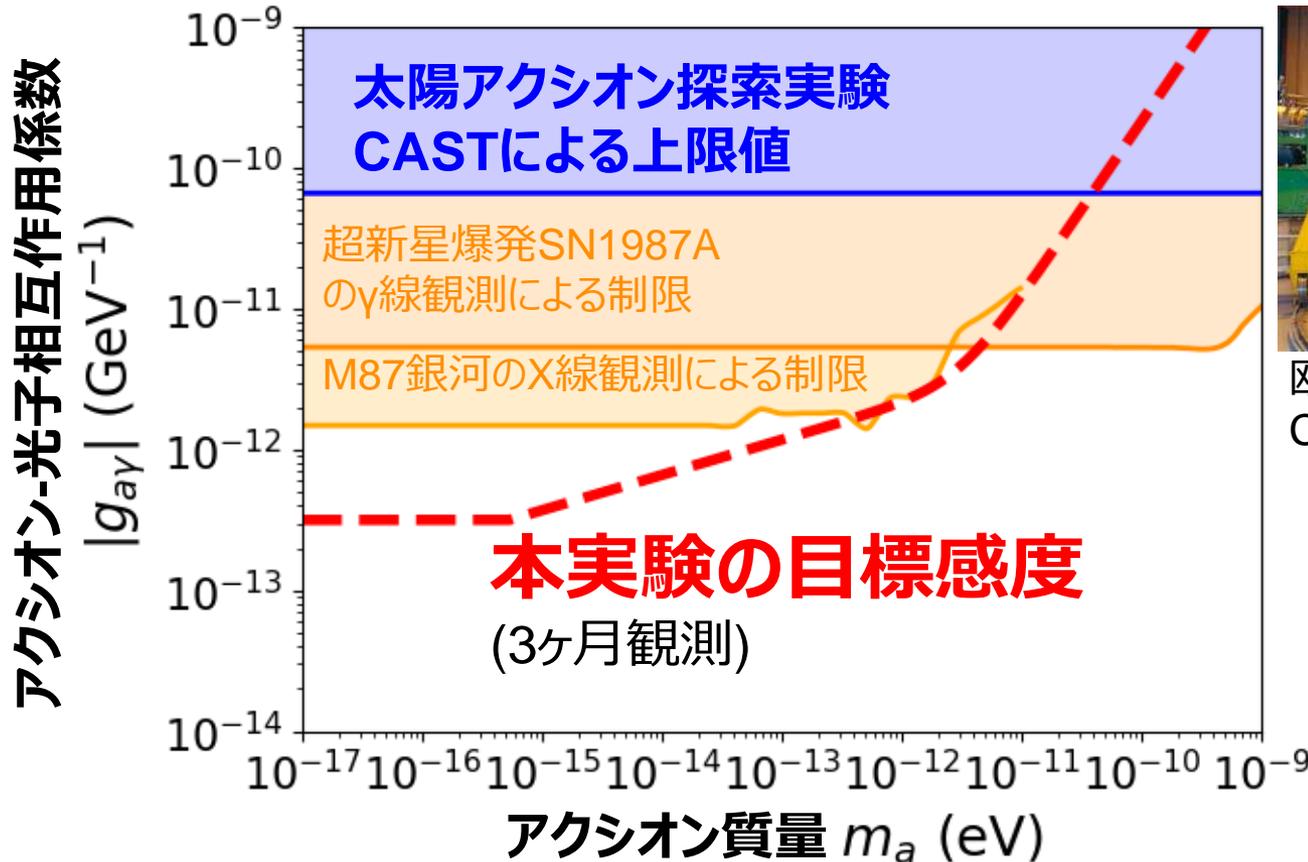
手法: 光リング共振器の偏光計測

- 線形光共振器では鏡の反射で偏光が反転
- ボウタイ型光リング共振器**を利用し、信号を効率的に増幅 [[PRL 121, 161301 \(2018\)](#) で提案]



達成目標: 世界最高感度での探索

- 先行研究の**未探索領域**を探索可能
- レーザー干渉計による**世界初**の本格探索



欧州原子核研究機構(CERN)
CAST

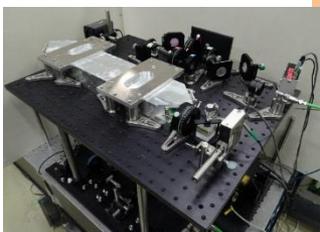
※ 天体観測からの制限は
天体のモデルや銀河内の
磁場モデルに依存するため
不定性がある
本研究のようなテーブルトッ
プ実験は不定性が少ない

- ショットノイズ以外の**雑音を低減**する必要

研究計画

2020年度

プロトタイプ実験
で原理実証



住友財団
基礎科学研究助成

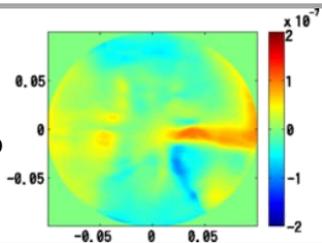
高反射率・
低偏光依存
コーティング
開発・評価

2021年度



フランス・
先端材料研究所
(LMA)と協力

国立天文台・
KAGRAの経験
を活かし、複屈折や
非一様性を低減



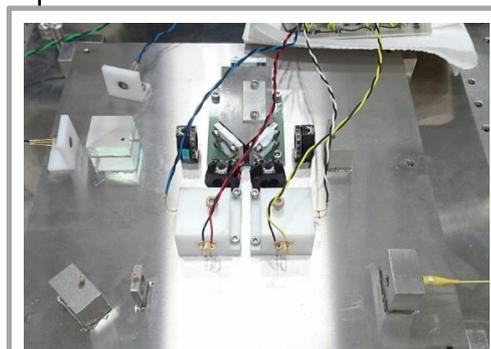
2022年度

偏光計測光学系の開発・評価

モノリシック光学系開発

環境モニタの設置
雑音低減

2023年度



ローレンツ不変性検証実験
で開発経験のある振動感
度の小さい光学系

3ヶ月の
観測運転

データ解析

革新的
光技術

革新的
光技術

光強度モニタ、温度計、
加速度計、磁束計など
を利用して雑音を
究極的に低減

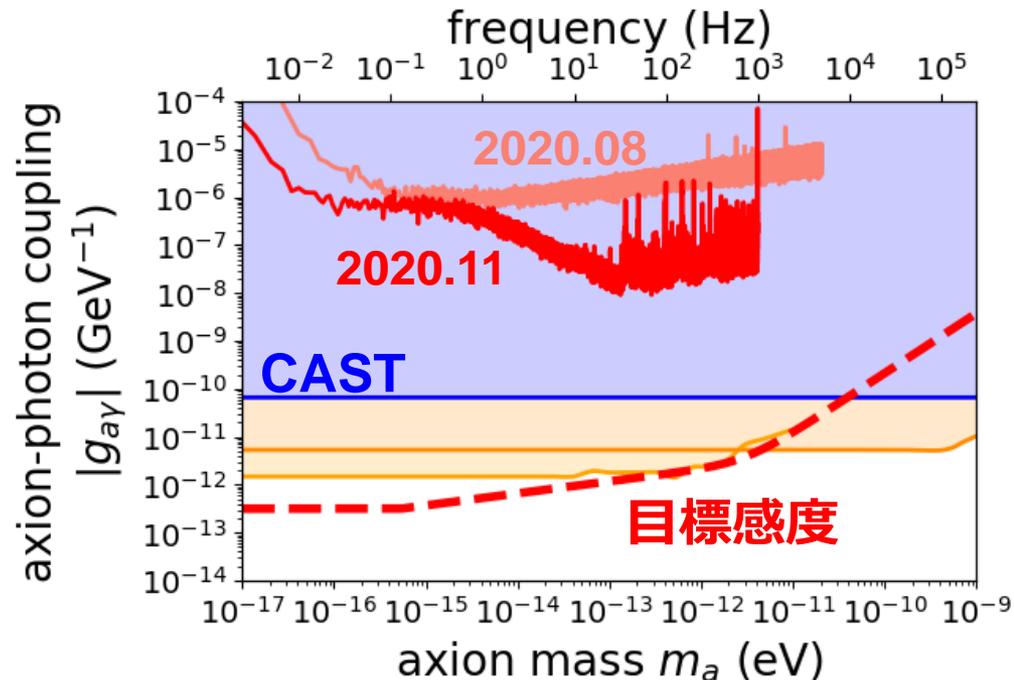
とまがけ開始

これまでの進展

- 同サイズ(周回長1 m)のプロトタイプを開発し、**動作実証に成功**
- 光の強度雑音、光学系の振動雑音で制限

公益財団法人
住友財団

- 11月から
 - 低偏光依存
コーティングの
共振器鏡を特注
 - 新しい共振器用
スパーサーを特注
 - その他光学素子を発注



※ 現在の感度で3ヶ月観測した場合の
予想感度

11月から学術変革領域研究も開始

- 学術変革では重力波望遠鏡による様々な種類の超軽量ダークマター探索を行う



狭帯域探索

偏光計測

変位計測



広帯域探索

偏光計測

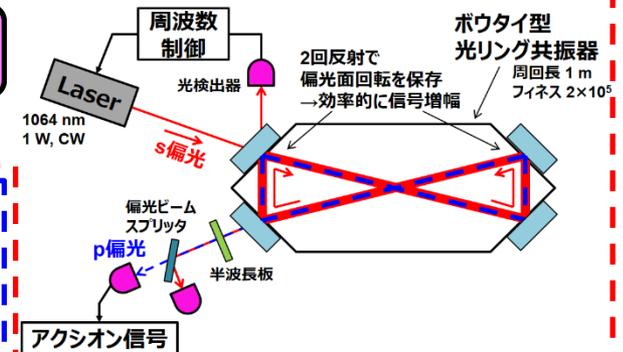
ダークマター理論

データ解析

大型化
高光強度化

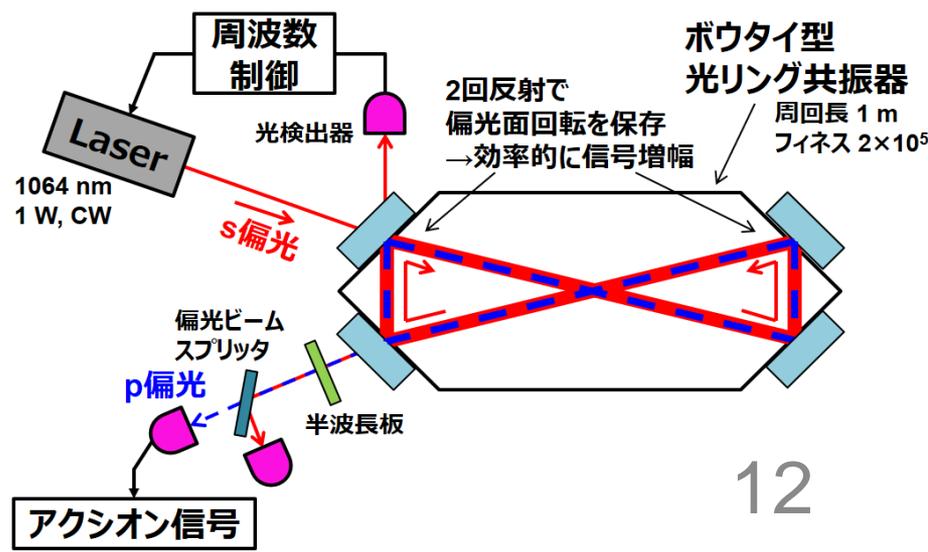
学術変革A

さきがけ



まとめ

- ダークマター探索は新局面を迎えている
- レーザー干渉計を用いた超軽量ダークマター探索が世界中で注目
- 有力候補である**アクシオン**に着目
- アクシオンによる**偏光面回転**を**ボウタイ型光リング共振器**で増幅し、超精密計測
- **世界最高精度**での探索を目指す



補足スライド

国内外の動向

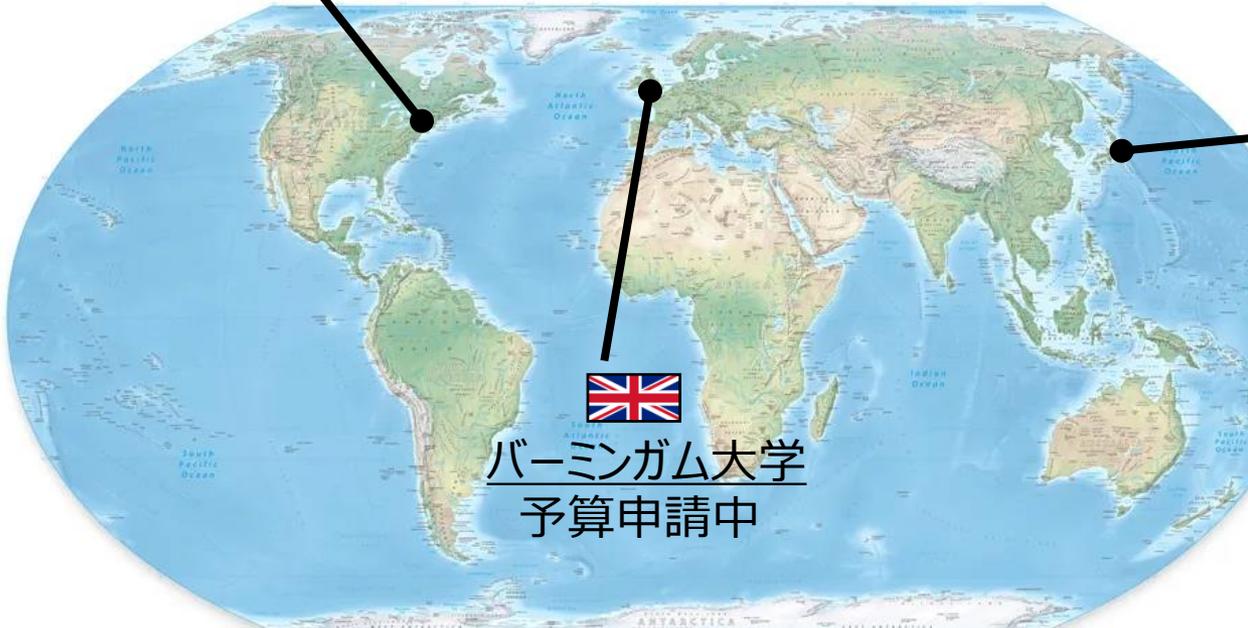
- 米英と初探索を目指す国際競争が始まろうとしている状況

ここ数年で立て続けに提案論文

-  DeRocco & Hook, [PRD 98, 035021 \(2018\)](#)
-  Obata, Fujita, YM, [PRL 121, 161301 \(2018\)](#)
-  Liu, Elwood, Evans, Thaler, [PRD 100, 023548 \(2019\)](#)
-  Nagano, Fujita, YM, Obata, [PRL 123, 111301 \(2019\)](#)
-  Martynov & Miao, [PRD 101, 095034 \(2020\)](#)



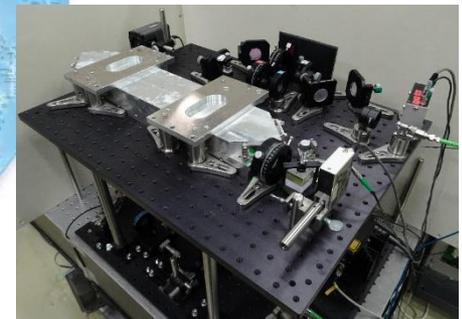
マサチューセッツ工科大学
プロトタイプ実験に着手




バーミンガム大学
予算申請中

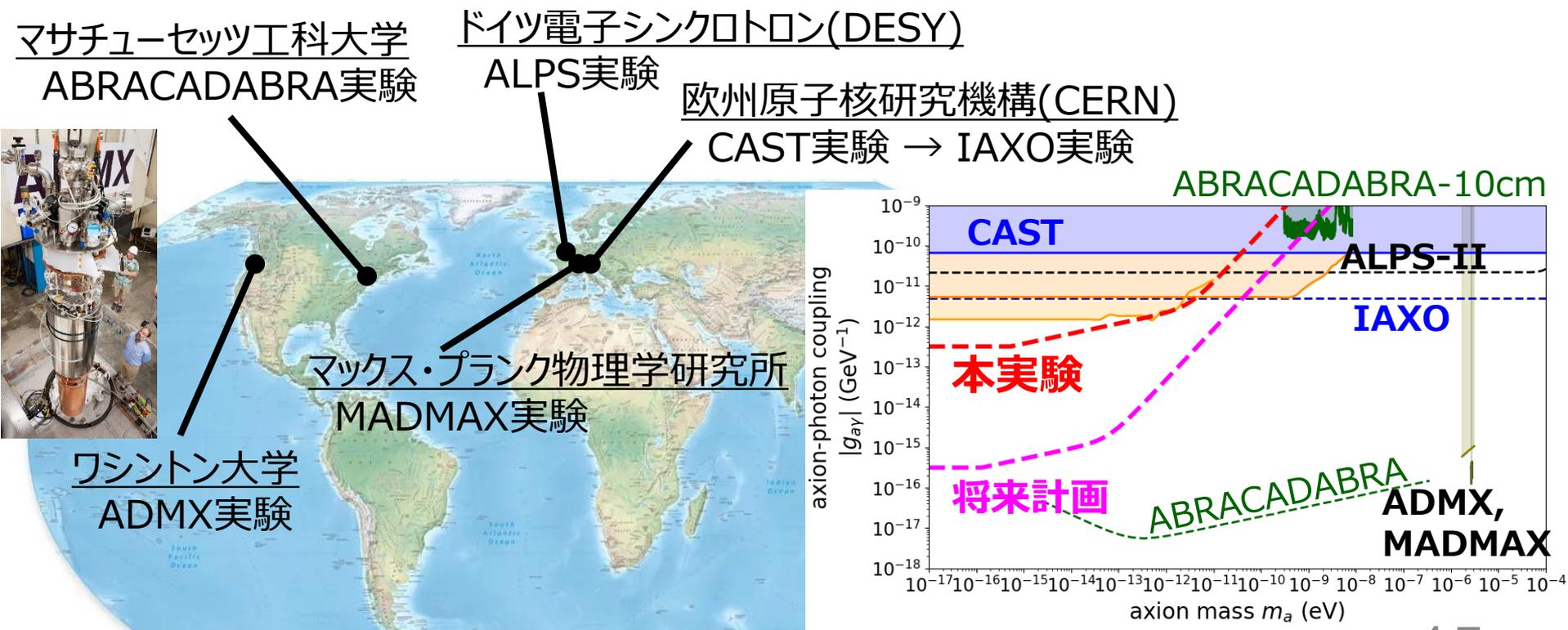


ボウタイ共振器を用いる**独自のアイデア**
プロトタイプ実験で原理検証
KAGRAの経験で優位性



本研究の独創性

- 強磁場を用いた実験は盛んに行われているが、高感度化にはさらなる強磁場化、大型化が必要
磁場実験は相互作用係数の2乗に感度、本実験は1乗に感度
- 本実験は**磁場が不要**、将来的な高感度化も可能



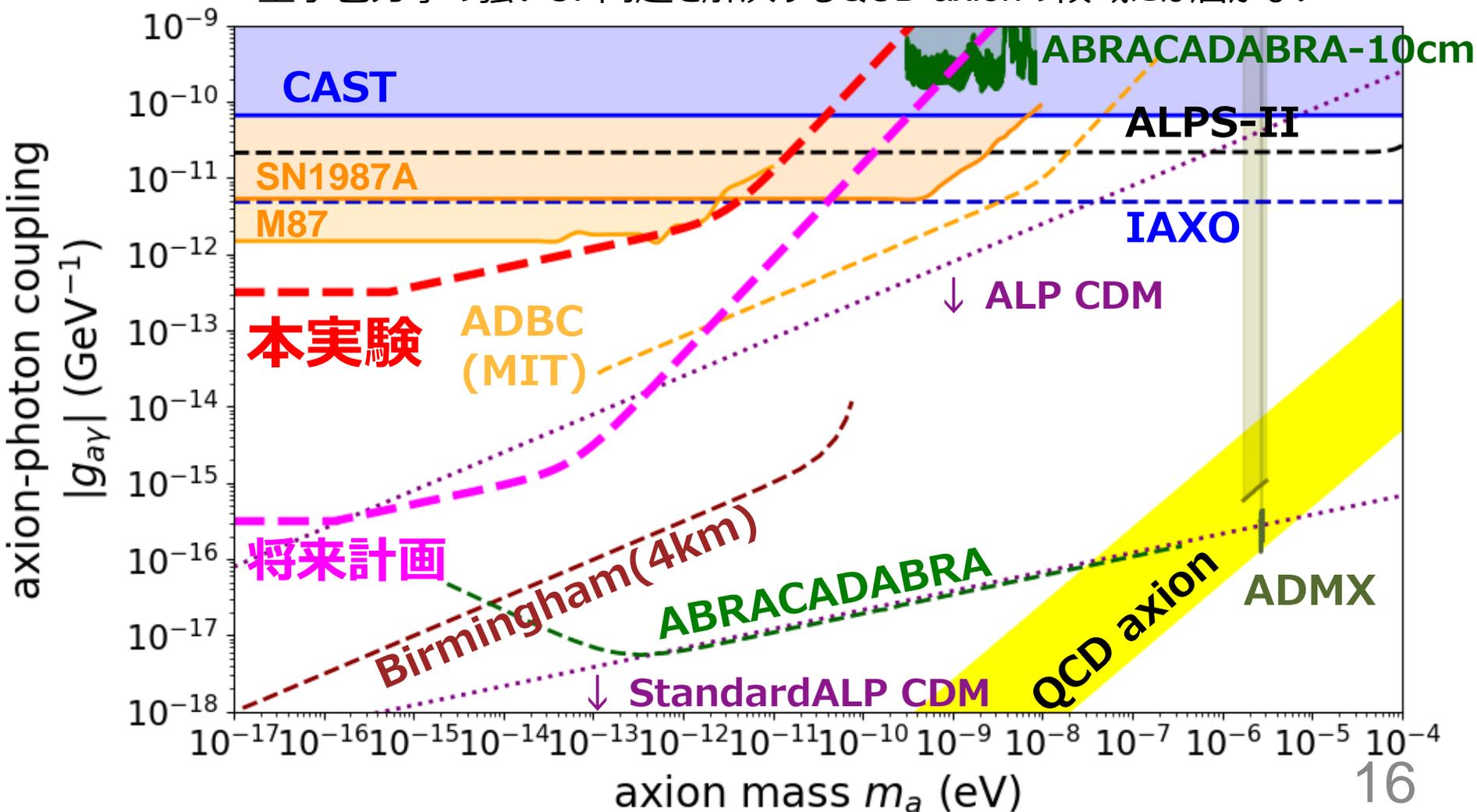
※ これらは全て磁場を用いる実験

他の実験提案・理論予想との比較

※ 結合定数の理論的予想は困難であり、網羅的な探索が重要

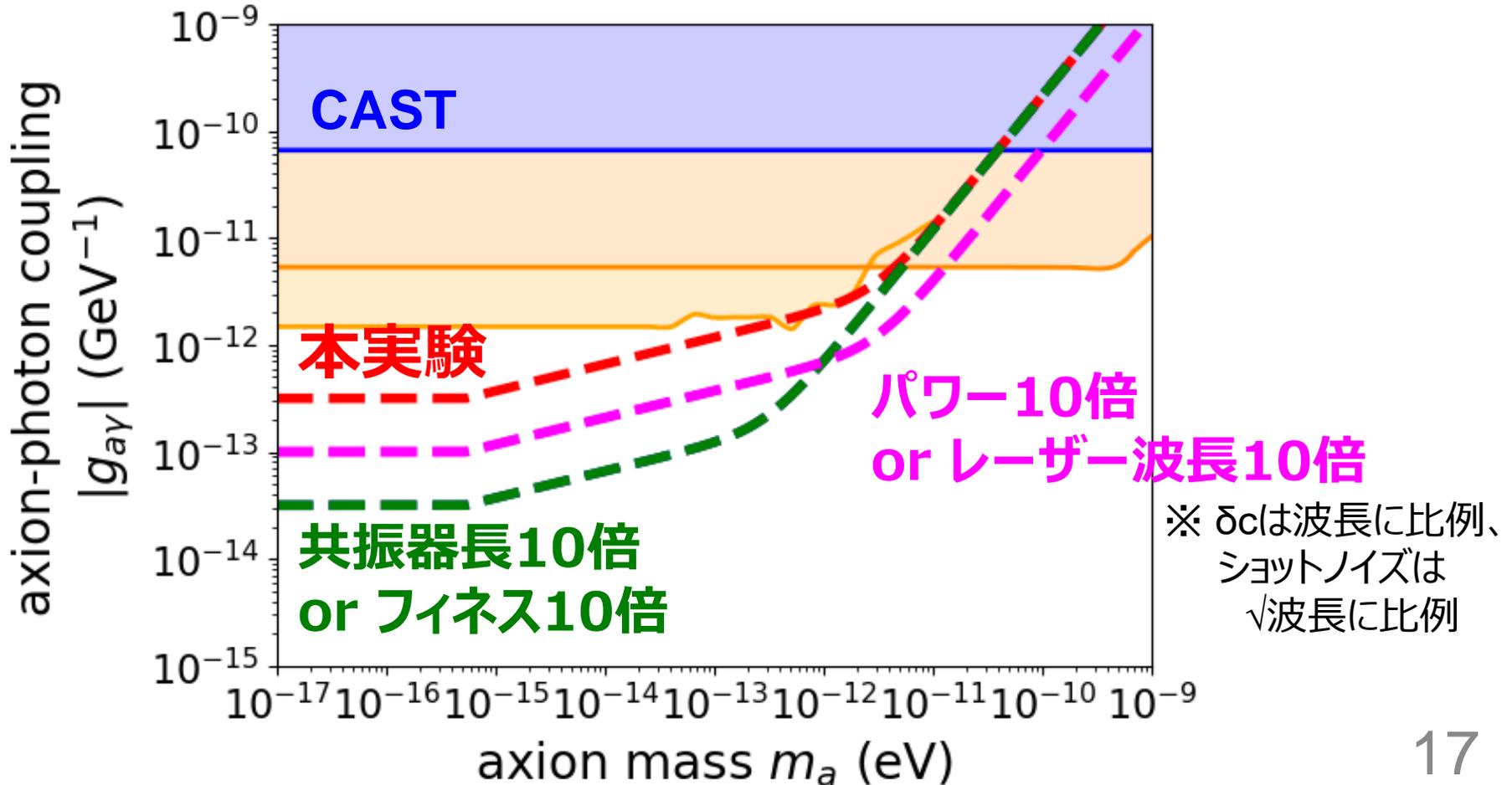
紫点線はP. Arias+ JCAP 06, 013 (2012)からの一例

量子色力学の強いCP問題を解決するQCD axionの領域には届かない



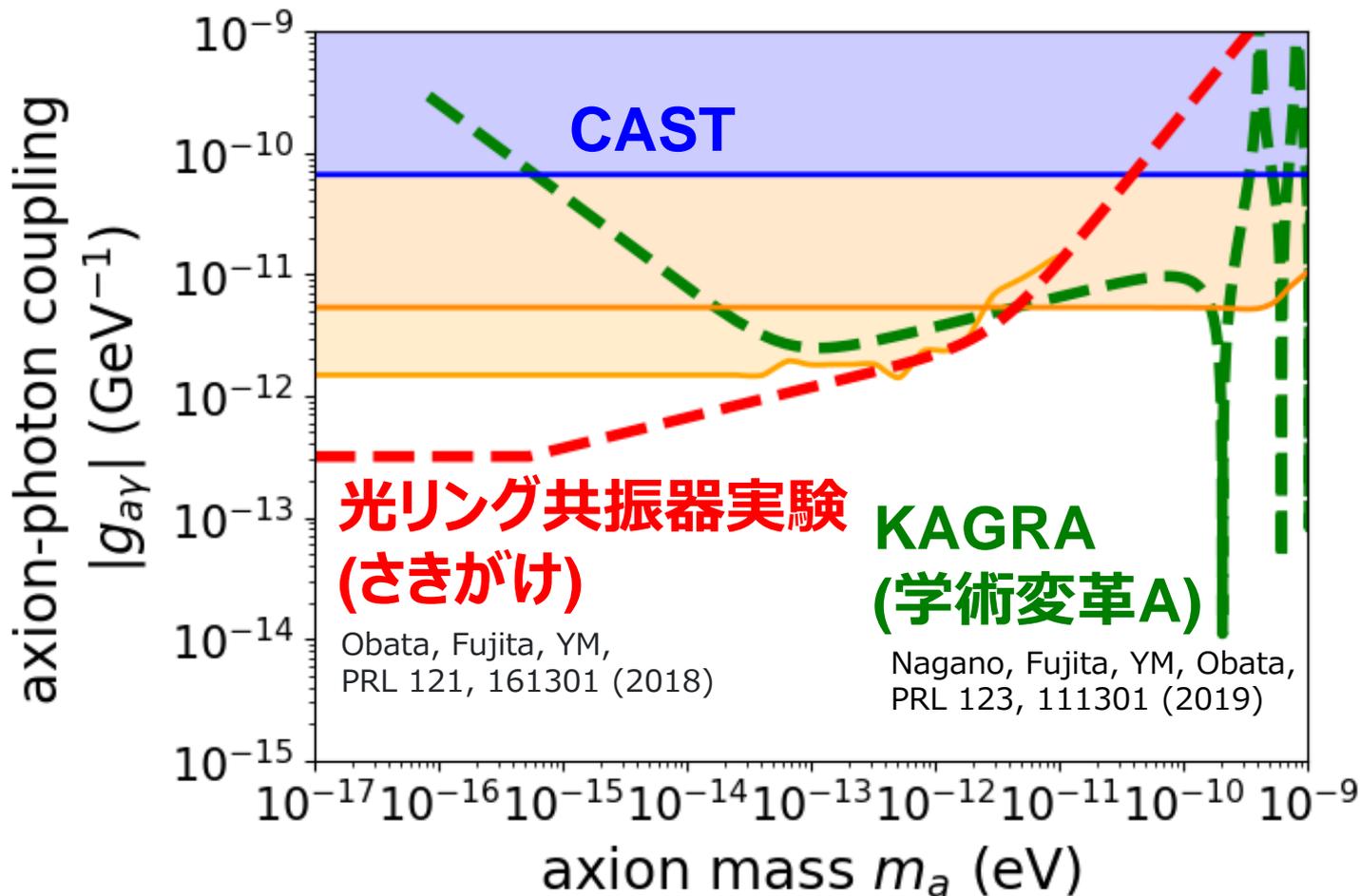
感度設計

- 最も良い感度は[共振器長]×[フィネス]で決まる(高感度にすると帯域は狭くなる)
- $\sqrt{[入射パワー]}$ 、 $\sqrt{[レーザー波長]}$ で全体の感度が決まる



光リング共振器とKAGRAの感度

- 光リング共振器は広帯域探索、
KAGRAは狭帯域探索で相補的



要求値など

- 右円偏光と左円偏光の光速の差

$$\delta c = 9 \times 10^{-23} \left(\frac{\lambda}{1064 \text{ nm}} \right) \left(\frac{g_{a\gamma}}{10^{-10} \text{ GeV}^{-1}} \right)$$

- 偏光の回転角 ↙ 共振器で増幅

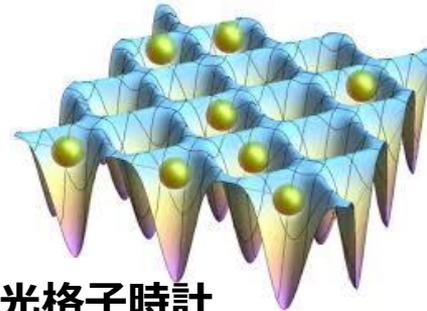
$$\delta \phi = 5 \times 10^{-16} \left(\frac{L}{1 \text{ m}} \right) \left(\frac{\lambda}{1064 \text{ nm}} \right) \left(\frac{g_{a\gamma}}{10^{-10} \text{ GeV}^{-1}} \right)$$

- ショットノイズ $\delta c_{\text{shot}} = 8 \times 10^{-22} / \sqrt{\text{Hz}}$
- 共振器鏡のsとpの位相差 $2\pi/\mathcal{F} = 3 \times 10^{-5} \text{ rad}$ 以下
- 偏光計測系でのsとpの光路差 5 nm RMS以下
光学素子の研磨、軸合わせ、熱処理などで実現
- 光学素子間の相対変動 (PD入射1 mW, PD効率の非一様性が10 /m程度と仮定)
 $6 \times 10^{-8} \text{ m} / \sqrt{\text{Hz}}$ 以下 (同相雑音除去比 1/100のモノリシック
光学系で実現可能)
- 相対強度安定度 $\delta P/P < 6 \times 10^{-7} / \sqrt{\text{Hz}}$ (1 uWのショットノイズ相当)
- 周波数 2.4 Hz が アクシオン質量 $1\text{e-}14 \text{ eV}$ に対応

他分野への応用展開

- 光周波数標準

光格子時計のプローブレーザー
を高安定光共振器で安定化



光格子時計
(東京大学 香取研究室)



高速認識・追尾事例
走行中の自動車のフロントガラス

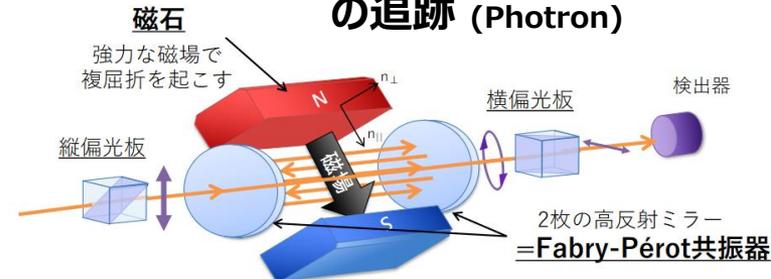
- 量子情報技術

偏光を量子ビットとした
量子情報技術の信頼性向上

偏光カメラによる自動車の追跡 (Photron)

- 偏光カメラ

偏光の精密計測による高感度化



真空の複屈折 (東京大学 浅井研究室)

- 偏光による宇宙観測

宇宙マイクロ波背景放射の偏光観測による原始重力波探索

- 真空の複屈折検証

偏光の精密計測による量子電磁力学の検証

- 重力波望遠鏡の高感度化

偏光サニャック干渉計の実現による
低周波感度の大幅向上

